多自由度跳躍ロボットの設計

— 基本設計と計算機シミュレーション —

有 川 敬 輔* 美 多 勉*

Design of Multi-DOF Jumping Robot

— Basic Design and Computer Simulation —

Keisuke Arikawa* and Tsutomu Mita*

We are researching design and control of jumping robots (e.g. normal jump, somersault, jump on a stair) composed of a multi degrees of freedom link. We call such robots "Multi-DOF Jumping Robot". In this paper, we deal with 5 link 4 joint serial link as an example of Multi-DOF Jumping Robot, and discuss about the way of determination of design parameters under realistic conditions. The design parameters mean not only mechanical parameters but also motion planning parameters. At first, we show the type of jumping motion that we deal with in this paper, and derive conditions to achieve that. Then, we propose a motion planning method for jumping motions on the basis of boundary state between ground and aerial phase. Next, we deliberate limit characteristic of DC motors that are suitable for Multi-DOF Jumping Robot design, and derive equations that express the limit characteristic. At last, we present one set of practical design parameters, and show simulation results of normal jump and somersault.

Key Words: Jumping Robot, Multi-DOF Robot Design, Jumping Motion Planning, DC Motor

1. は じ め に

我々は、「跳躍」「宙返り」「段差飛び乗り」といった運動を行う、多自由度のリンク系によって構成されたロボットの実現を目指して研究を行っている (Fig. 1). これは、脚型移動ロボット、ヒューマノイドロボット等の性能向上のためであると考えている。本論文では、このようなロボットを多自由度跳躍ロボットと呼ぶことにする。

多自由度跳躍ロボットの実現を考えた場合、次のような課題に直面する。まず、制御上の課題が挙げられる。多自由度跳躍ロボットは、足が床から離れた後、重心廻りの角運動量が一定というノンホロノミック拘束を受けるが、空中で巧みに姿勢を制御することで目標状態に到達させるというノンホロノミック制御の課題である [1]。さらに、機械設計上の課題が挙げられる。多自由度跳躍ロボットには、重力に抗した方向を含め、様々な方向に俊敏な運動をしなくてはならないという、現在のアクチュエータの性能から見て極めて厳しい要求が課されるが、その要求を満たしうる各種設計パラメータを設定するという課題である [2] [3]。このように、多自由度跳躍ロボットは、制御の面から見ても、機械設計の面から見ても興味深い課題を有する研究対象であり、その実現過程で得られる知見は、特に、ノンホロノ

ミック制御の実機械システムへの適用、および、多自由度機械設計の分野に、広く応用できるものと期待できる。

本論文では、後者の課題、つまり、多自由度跳躍ロボットの機械設計上の課題に焦点を当て、その設計パラメータを決定することを目的とする。これまでに、跳躍を伴った運動を行うロボットの機械設計に関する様々な研究が行われ、実際に機械モデルも実現されている [4]~[10]。しかし、その多くは、詳細な考察のもと、跳躍に特化した機構を導入することで跳躍運動を実現しており、本研究で対象としているような、多自由度のリンク系によって構成された跳躍ロボットの機械設計については、ほとんど研究されていない。

Fig. 2 に、本論文で対象とする多自由度跳躍ロボットのモデ

Fig. 1 Multi-DOF Jumping Robot

原稿受付 2001 年 6 月 15 日

*東京工業大学

*Tokyo Institute of Technology

Fig. 2 5 link, 4 joint serial link in vertical plane

ルを示す。5リンク4関節（すべて能動関節）のシリアルリンクによって構成された鉛直二次元平面上を運動するロボットである（Fig. 2 に示すように、本論文では、鉛直上方向を Y 方向、水平右方向を X 方向とする）。また、本論文でいう設計パラメータとは、形状、質量、関節可動範囲、アクチュエータ、減速比といった機械的設計パラメータはもちろんのこと、どのように跳躍運動を行うかといった運動計画に関するパラメータをも含んでいる。なぜなら、特に、多自由度機構の場合、運動計画によって各関節の運動状態は大きく異なり、これらを切り離して考えることはできないためである [3]。

本研究では、多自由度跳躍ロボットの運動を計算機によってシミュレートすることで設計パラメータを決定するが、その計算機シミュレーションにおいて重視した点は、運動の特徴を理解した上で、運動計画やアクチュエータに対して、いかに現実には制約条件を課すかという点である。本論文では、この点を中心に論じる。まず、対象とする跳躍運動を明確化し、その跳躍運動を実現するための条件を示す。次いで、浮遊期における運動の特徴に基づいた運動計画の一手法を示す。さらに、多自由度跳躍ロボットの設計に適した DC モータの限界特性について考察し、その計算方法を示す。最後に、実際に設定可能な設計パラメータを持った多自由度跳躍ロボットのモデルを示し、前方への跳躍、後方宙返りという2種類の運動についてシミュレーション結果を示す。

2. 対象とする跳躍運動

ロボットの足が床に触れている期間を接地期（Ground Phase）、触れていない期間を浮遊期（Aerial Phase）と呼ぶことにする。本論文では、多自由度跳躍ロボット設計のための運動シミュレーションとして、足が床に接地し静止した状態から、浮遊期に移り、着地する前までの運動を取り上げる（着地および着地後の運動や、足以外の部分が床に触れる運動は扱わない）。そして、跳躍運動と言った場合このような運動を指すことにする。

また、接地期から浮遊期に至る過程を、足と床との接触状態に着目すると Fig. 3 のように4通りに場合分けすることができる。すなわち、接地期に、A: 滑らず、爪先、踵立ちにならない場合、B: 爪先、踵立ちになる場合、C: 滑る場合、D: 両方が生じる場合である。本論文では、特に、Fig. 3 A のタイプの跳躍運動を対象にする。以下に、この跳躍運動を実現するための条件を誘導する。ここで用いる記号は次の通りである（Fig. 4）。

Fig. 3 Possible jumping motions

Fig. 4 Contact of foot and floor

F_g : 足に加わる重力ベクトル

F_{ak} : 足首関節を介して、上部のリンク系から受ける力ベクトル

τ_{ak} : 足首関節を介して、上部のリンク系から受けるトルク

F_{fl} : 床反力ベクトル（足裏が床から受ける力）

$l_{h,t,ak}$: 足の重心位置から各点に至るベクトル

μ : 足裏と床面との静止摩擦係数

まず、足裏は床を引っ張ることはできないことから、 F_{fl} の鉛直 (Y) 方向成分は正でなくてはならない。

$$F_{fly} \geq 0 \quad (1)$$

この条件は同時に、足裏が床から受けるトルクが零であることを意味している。なぜなら、もし、これが零でないとなると、足裏に偶力（大きさは同じ、向きは逆、同一直線上にない一対の力）が作用することを意味するが、一方の力を足が床を押す方向にとると、他方は必ず床を引っ張る方向になってしまうからである。

また、足が滑らないための条件は、クーロン摩擦を仮定すると、直ちに、次式によって表される。

$$\frac{|F_{flx}|}{F_{fly}} \leq \mu \quad (2)$$

次に、爪先、踵立ちの状態にならないための条件について考える。Fig. 4 において、力の釣り合い、重心廻りのトルクの釣り合いは、それぞれ、次式によって表される。

$$F_g + F_{ak} + F_{fl} = 0 \quad (3)$$

$$\mathbf{l}_{ak} \times \mathbf{F}_{ak} + \tau_{ak} + \mathbf{l}_{fl} \times \mathbf{F}_{fl} = 0 \quad (4)$$

$\mathbf{a} \times \mathbf{b}$ なる演算は、 $\mathbf{a} \times \mathbf{b} = a_x b_y - a_y b_x$ を表す。ここで、 $\mathbf{l}_{fl}$ を、実数 s を用いて、踵と爪先を結ぶ直線上の点を表す式として表すことにする。

$$\mathbf{l}_{fl} = (1-s)\mathbf{l}_h + s\mathbf{l}_t \quad (5)$$

床反力は、足裏でしか受けることができないため、式 (4) の釣り合い式が意味をもつのは、

$$0 \leq s \leq 1 \quad (6)$$

のときである。すなわち、式 (6) の条件を満たせば、爪先立ちにも踵立ちにもならないことが保証される。式 (5) を式 (4) に代入し、 s について解くと、

$$s = -\frac{\mathbf{l}_{ak} \times \mathbf{F}_{ak} + \tau_{ak} + \mathbf{l}_h \times \mathbf{F}_{fl}}{(\mathbf{l}_t - \mathbf{l}_h) \times \mathbf{F}_{fl}} \quad (7)$$

式 (7) を式 (6) に代入し、 $(\mathbf{l}_t - \mathbf{l}_h) \times \mathbf{F}_{fl} \geq 0$ であることに注意して解くと、次式が得られる。

$$\mathbf{l}_h \times \mathbf{F}_{fl} \leq -\mathbf{l}_{ak} \times \mathbf{F}_{ak} - \tau_{ak} \leq \mathbf{l}_t \times \mathbf{F}_{fl} \quad (8)$$

式 (8) が、爪先立ちにも、踵立ちにもならないための条件である。式 (8) から分かるように、この条件は、足の形状 ($\mathbf{l}_h$, $\mathbf{l}_t$, $\mathbf{l}_{ak}$) に強く依存する。

以上より、本論文で対象とする Fig. 3 A の跳躍運動を実現するためには、接地期において、式 (1), (2), (8) の条件を満たしていなくてはならないことが明らかとなった。

3. 運動計画

3.1 基本方針

ある設計パラメータを評価するためには、その設計パラメータを持った多自由度跳躍ロボットが、どの程度の跳躍運動を実現できるか評価する必要がある。その過程の中で運動計画が必要となる。本研究では、この過程を次のように行うことにした。

まず、目標の跳躍運動を、例えば、前方に跳躍、後方宙返りと言ったレベルで与える（浮遊期の最後に目標状態を設定し、そこに収束させるというフィードバック制御は行わない）。そして、その目標運動を実現する各関節角度の時間変化 $\theta(t)$ を滑らかに与え ($\dot{\theta}(t)$, $\ddot{\theta}(t)$ も生成される)、そのとき、 $\theta(t)$, $\dot{\theta}(t)$, $\ddot{\theta}(t)$ を目標軌道として逆動力学計算を行い、結果として生じる跳躍運動を評価する。

つまり、本論文で行う運動計画は、目標の跳躍運動を実現する $\theta(t)$ を計画することである。

3.2 浮遊期の特徴と運動計画

接地期にロボットに作用する外力は重力と床反力であるのに対して、浮遊期にロボットに作用する外力は重力のみである。このことと、運動の法則を合わせると、浮遊期に入ったロボットの運動は、次のように特徴付けられる (Fig. 5)。ここで、浮遊期に入る瞬間の状態（接地期が終わる瞬間の状態）のことを、境界状態 (Boundary) と呼ぶことにする。

まず、並進運動に関して、浮遊期にどのように関節を動かそ

Fig. 5 Motion in aerial phase

うとも、ロボット全体の重心は、境界状態における重心の位置および速度によって一意に決まる放物運動を行う。さらに、回転運動に関して、浮遊期にどのように関節を動かそうとも、ロボット全体の重心廻りの角運動量は、境界状態における重心廻りの角運動量のまま一定である。このことは、浮遊期に、身体全体を伸ばすなどして慣性モーメントの大きな姿勢をとれば、全体の回転速度は遅くなり、逆に、身体全体を縮めるなどして慣性モーメントの小さな姿勢をとれば、全体の回転速度は速くなることを意味する。

以上のことから分かるように、境界状態における、ロボット全体の重心の位置、速度、重心廻りの角運動量は、浮遊期のロボットの運動を大きく特徴付ける重要な量である。逆にいえば、浮遊期に実行させたい運動が決まれば、これらの量もある程度決まるのである。例えば、鉛直上方向にジャンプする場合は、境界状態における重心の速度の方向は、ほぼ鉛直上方向、角運動量は小さいのが有利である。後方宙返りを行う場合は、重心の速度の方向は、鉛直上方向から後方に傾いた方向、角運動量は宙返りの回転方向に大きいのが有利である。

本研究では、このことに着目し、境界状態におけるロボット全体の重心の位置、速度、重心廻りの角運動量を中心にして、跳躍運動の運動計画を行うことを考えた。具体的には、次のことを行う。最初に、目標の跳躍運動に応じて、境界状態におけるこれらの量を与える。次に、境界状態における各関節の角度、角速度、角加速度を求める。そして、初期状態から境界状態に至る接地期の関節軌道計画、境界状態から始まる浮遊期の関節軌道計画を行う。

3.3 境界状態

上述の運動計画を行うに当たり、まず、次の問題について考える (Fig. 6)。

- 境界状態 (時間 $t = t_b$) における、ロボット全体の重心位置 $\mathbf{P}_g(t_b)$ 、重心の並進速度 $\dot{\mathbf{P}}_g(t_b)$ 、重心廻りの角運動量 $L_g(t_b)$ が与えられたとき、それを実現する関節角度 $\theta(t_b)$ 、角速度 $\dot{\theta}(t_b)$ 、角加速度 $\ddot{\theta}(t_b)$ を求める。

この問題は、以下の三つの問題に細分化できる。

- (1) $\mathbf{P}_g(t_b)$ から $\theta(t_b)$ を求める。
- (2) $\dot{\mathbf{P}}_g(t_b)$, $L_g(t_b)$ から $\dot{\theta}(t_b)$ を求める。
- (3) 問題 (1), (2) で求めた $\theta(t_b)$, $\dot{\theta}(t_b)$ から、その状態が境界状態となるよう $\ddot{\theta}(t_b)$ を求める。

問題 (1), (2) は、一般のマニピュレータの運動学問題に相当

Fig. 6 Boundary between ground and aerial phase

し、それぞれ、逆運動学解、逆ヤコビ行列を求めることと基本的に等価である。機構が4自由度であるため、各関節角度 $\theta(t_b)$ 、関節角速度 $\dot{\theta}(t_b)$ は一意には定まらないが、ここでは、関節3, 4の角度 $\theta_3(t_b)$, $\theta_4(t_b)$ 、それに、関節4の角速度 $\dot{\theta}_4(t_b)$ を指定することで以下のように計算することにした。

$$\begin{pmatrix} \theta_1 \\ \theta_2 \\ \theta_3 \\ \theta_4 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} f_1(P_{gx}, P_{gy}, \theta_3, \theta_4) \\ f_2(P_{gx}, P_{gy}, \theta_3, \theta_4) \\ \theta_3 \\ \theta_4 \end{pmatrix} \quad (9)$$

$$\begin{pmatrix} \dot{\theta}_1 \\ \dot{\theta}_2 \\ \dot{\theta}_3 \\ \dot{\theta}_4 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} g_1(\dot{P}_{gx}, \dot{P}_{gy}, L_g, \dot{\theta}_4) \\ g_2(\dot{P}_{gx}, \dot{P}_{gy}, L_g, \dot{\theta}_4) \\ g_3(\dot{P}_{gx}, \dot{P}_{gy}, L_g, \dot{\theta}_4) \\ \dot{\theta}_4 \end{pmatrix} \quad (10)$$

ただし、 $f_{1,2}$ および $g_{1,2,3}$ は解を表す関数である。

次に、問題(3)について考える。浮遊期の運動を表す運動方程式と接地期の運動を表す運動方程式は異なるが、境界状態は、両方の運動方程式に矛盾なく適合するはずである。したがって、境界状態のことを、床反力が零という特殊な接地期としてとらえることが可能である。ここでは、このことを用いて、問題(3)を解くことを考えた。

式(1),(2),(8)の条件が満たされている限りにおいては、足リンクは床の一部と見なせ、このロボットは、床に固定された平面4自由度のシリアルリンク機構と見なせる。さて、ダランベールの原理に基づいて、各リンクの動力的釣合い式を立て、まとめると、次式のようになる(右肩の添え字は、行列の大きさを表す)。

$$B^{(12 \times 12)} \begin{pmatrix} \tau^{(4 \times 1)} \\ F^{(8 \times 1)} \end{pmatrix} = A^{(12 \times 4)} \ddot{\theta}^{(4 \times 1)} + k(\theta, \dot{\theta})^{(12 \times 1)} \quad (11)$$

ここで、 τ は関節トルク、 F は関節間に作用する τ 以外の内力 (Fig. 7)、 k は非線形項をまとめたものを表す。さらに、式(11)は、次式のように変形できる。

$$\left(-A^{(12 \times 4)} \mid B^{(12 \times 12)} \right) \begin{pmatrix} \ddot{\theta}^{(4 \times 1)} \\ \tau^{(4 \times 1)} \\ F^{(8 \times 1)} \end{pmatrix} = k(\theta, \dot{\theta})^{(12 \times 1)} \quad (12)$$

Fig. 7 Joint internal forces except τ

$\theta, \dot{\theta}$ が与えられたとすると、式(12)は未知数 $\ddot{\theta}, \tau, F$ に関する、連立一次方程式である。式(12)のままでは、未知数の数が式の数より4だけ多いため、一意には解は求まらない。そこで、式(12)に、式(13)のような未知数に関して線形な4本の式を組み込み、式(14)を作ることを考える。

$$C^{(4 \times 16)} \begin{pmatrix} \ddot{\theta}^{(4 \times 1)} \\ \tau^{(4 \times 1)} \\ F^{(8 \times 1)} \end{pmatrix} = D^{(4 \times 1)} \quad (13)$$

$$\begin{pmatrix} -A^{(12 \times 4)} \mid B^{(12 \times 12)} \\ C^{(4 \times 16)} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \ddot{\theta}^{(4 \times 1)} \\ \tau^{(4 \times 1)} \\ F^{(8 \times 1)} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} k(\theta, \dot{\theta})^{(12 \times 1)} \\ D^{(4 \times 1)} \end{pmatrix} \quad (14)$$

このとき、式(14)の左辺第1項が正則なら、未知数 $\ddot{\theta}, \tau, F$ は直ちに計算できる。例えば、 I を単位行列として、 $C = (I^{(4 \times 4)} \mid 0^{(4 \times 12)})$ 、 $D = \ddot{\theta}$ としたとする。これは、関節角加速度 $\ddot{\theta}$ を $\hat{\theta}$ に指定したことを意味し、式(14)の未知数を計算することは、逆運動学計算を行うことに相当する。また、 $C = (0^{(4 \times 4)} \mid I^{(4 \times 4)} \mid 0^{(4 \times 8)})$ 、 $D = \tau$ としたとする。これは、関節トルク τ を $\hat{\tau}$ に指定したことを意味し、式(14)の未知数を計算することは、順運動学計算を行うことに相当する。

式(14)を利用すれば、問題(3)は次のように解くことができる。まず、問題(1),(2)を解き、 $\theta(t_b)$ 、 $\dot{\theta}(t_b)$ を計算する。この時点で、式(14)の C, D をいかに設定するかという問題となる。さて、床反力が零であるということは、足リンクに関する力とトルクの釣り合い式、式(3),(4)において、 $F_{fl} = 0$ ということである (Fig. 4)。すなわち、

$$F_g + F_{ak} = 0 \quad (15)$$

$$l_{ak} \times F_{ak} + \tau_{ak} = 0 \quad (16)$$

これらの条件式は、成分に分けると3本の式となるが、 $F_{ak} (= -F_1)$ 、 $\tau_{ak} (= -\tau_1)$ に関して線形式であるため、 C, D に埋め込むことができる。 C, D を構成するためには、さらに、もう1本、未知数に関して線形式が必要である。式(14)の左辺第1項が正則になるのであれば、どのような式でも使用可能であるが、物理的意味が明確で簡潔な式の一つとして、境界

Fig. 8 Motion planning in ground phase

状態における関節 4 の角加速度 $\ddot{\theta}_4$ を指定する式

$$\ddot{\theta}_4 = \ddot{\theta}_4(t_b) \quad (17)$$

を採用することにした。そして、式 (14) の連立一次方程式を解くことで、 $\ddot{\theta}(t_b)$ を得る。

以上まとめると、境界状態におけるロボットの重心位置 $P_g(t_b)$ 、重心の並進速度 $\dot{P}_g(t_b)$ 、重心廻りの角運動量 $L_g(t_b)$ 、さらに、 $\theta_3(t_b)$ 、 $\theta_4(t_b)$ 、 $\dot{\theta}_4(t_b)$ 、 $\ddot{\theta}_4(t_b)$ を与えれば、それを実現する関節角度 $\theta(t_b)$ 、角速度 $\dot{\theta}(t_b)$ 、角加速度 $\ddot{\theta}(t_b)$ を求めることが可能となった。

3.4 接地期の運動計画

跳躍運動を開始するときの関節角度 $\theta(0)$ を指定したとする。このとき、接地期の運動は、初期状態 ($\theta(0)$, $\dot{\theta}(0) = 0$, $\ddot{\theta}(0) = 0$) から、境界状態 ($\theta(t_b)$, $\dot{\theta}(t_b)$, $\ddot{\theta}(t_b)$) に向けた運動であるが、その際、以下に示すような運動計画を行うことにした (Fig. 8)。ロボットの外部から観察した場合、接地期の運動の基本要素は、初期状態からの加速と境界状態に近づいたときの減速である。このことから、複雑な運動をせずとも、接地期の運動の基本要素は実現できると考え、各関節角度を時間に関する五次多項式 (初期状態と境界状態における各関節合計 6 個の境界条件を設定できる最低次数) で与えることにした。つまり、

$$\theta(t) = \sum_{i=0}^5 a_i t^i \quad (18)$$

ここで、各係数は $\theta(0)$, $\dot{\theta}(0) = 0$, $\ddot{\theta}(0) = 0$, $\theta(t_b)$, $\dot{\theta}(t_b)$, $\ddot{\theta}(t_b)$ から一意に定まる。

3.5 浮遊期の運動計画

時間 $t = t_b$ において境界状態に達した後、浮遊期に移る。先に述べたように、浮遊期間中、ロボット全体の重心は放物運動を行うが、このとき、重心位置の水平方向成分 $P_{gx}(t)$ 、鉛直方向成分 $P_{gy}(t)$ は次式によって表される (g は重力加速度)。

$$P_{gx}(t) = P_{gx}(t_b) + \dot{P}_{gx}(t_b)(t - t_b) \quad (19)$$

$$P_{gy}(t) = P_{gy}(t_b) + \dot{P}_{gy}(t_b)(t - t_b) - \frac{1}{2}g(t - t_b)^2 \quad (20)$$

ここで、浮遊期に入った後、重心位置の鉛直方向成分 $P_{gy}(t)$ が、接地期および境界状態の足首位置の鉛直方向成分 P_{aky} と一致する時間を t_e とする (Fig. 9)。式 (20) において、

Fig. 9 Motion planning in aerial phase

$P_{gy}(t) = P_{aky}$, $t = t_e$ として、 t_e について解くと、

$$t_e = t_b + \frac{\dot{P}_{gy}(t_b) + \sqrt{\dot{P}_{gy}(t_b)^2 + 2g(P_{gy}(t_b) - P_{aky})}}{g} \quad (21)$$

本論文では、着地および着地後の運動については扱わないが、便宜上、 t_e まで浮遊期の運動計画を行うことにする。また、着地後、様々な運動に移ることを考慮し、 $\dot{\theta}(t_e) = 0$, $\ddot{\theta}(t_e) = 0$ なる条件を課す。そして、浮遊期の運動計画を次のように行うことにした (Fig. 9)。 $t_b < t_{a1} < t_{a2} < t_e$ を満たす t_{a1} , t_{a2} , t_e における関節角度 $\theta(t_{a1})$, $\theta(t_{a2})$, $\theta(t_e)$ を指定し、 $t_b < t \leq t_e$ における関節角度変化を五次のスプラインによって表す (各節点の間は式 (18) と同様)。ここで、各係数は $\theta(t_b)$, $\dot{\theta}(t_b)$, $\ddot{\theta}(t_b)$, $\theta(t_{a1})$, $\theta(t_{a2})$, $\theta(t_e)$, $\dot{\theta}(t_e) = 0$, $\ddot{\theta}(t_e) = 0$, および、 t_{a1} , t_{a2} において 4 階微分まで連続という条件から一意に定まる。

3.6 運動計画と自由度

本章で論じた方法を、そのまま適用することのできる、多自由度跳躍ロボットの最低の自由度数は 3 (4 リンク 3 関節) である。この場合には、 $\dot{P}_{gx}$, $\dot{P}_{gy}$, L_g から各関節の角速度を一意に定めることができ (式 (10) 参照)、また、式 (14) において、 $\ddot{\theta}^{(3 \times 1)}$, $\tau^{(3 \times 1)}$, $F^{(6 \times 1)}$, $A^{(9 \times 3)}$, $B^{(9 \times 9)}$, $C^{(3 \times 12)}$, $D^{(3 \times 1)}$ となり、式 (15), (16) のみで過不足なく C , D を構成できる。したがって、本論文で対象としている 5 リンク 4 関節の場合に比べ、冗長系としての扱いが大幅に簡略化されることになる。このことは、計算上の利点であるが、同時に、実現可能な跳躍運動を制限する要因でもある。なぜなら、冗長自由度を活用 (本章で論じた方法では、 $\theta_3(t_b)$, $\theta_4(t_b)$, $\dot{\theta}_4(t_b)$, $\ddot{\theta}_4(t_b)$ を調整) することで、各関節の運動状態を変化させることができ、より多様な跳躍運動について、床反力や後に説明するアクチュエータによる制約条件を満足させられるからである。つまり、5 リンク 4 関節の方が、多様な跳躍運動を実現できると期待できる。

4. アクチュエータによる制約条件

4.1 跳躍運動と DC モータの限界特性

ロボットの運動性能は、アクチュエータの性能に大きく左右される。一方、現在のアクチュエータの出力重量比をはじめとした性能は絶対的に低い状況にあり、このような状況のもと、高い運動性能を発揮するロボットを実現するためには、アクチュ

エータの特性を慎重に配慮することが不可欠である [2]。多自由度跳躍ロボットには、要求される運動に関して、重力に抗した方向も含め、様々な方向に俊敏に運動できなくてはならないという非常に厳しい要求が課されるため、ことさら慎重になるべきである。

アクチュエータの特性の中でも、実現可能な動作と実現不可能な動作の境界（限界特性）を見極めることは特に重要である。各関節に装備したアクチュエータの限界特性を、リンク系をはじめとした機構によって変換したものが、すなわち、そのロボットの発揮しうる運動性能そのものといっても過言ではない。

我々が開発を行っている多自由度跳躍ロボットでは、アクチュエータとして DC モータを想定している。そこで、ここでは、DC モータを取り上げることとする。一般に、DC モータの限界特性は、パワー、トルク、角速度、電流、電圧、発熱量、デューティなどを基にして多種多様に定義される。どの限界特性を用いるかは、その機械に想定される運動の特徴を考慮した上で判断すべきである。多自由度跳躍ロボットに想定される運動の特徴を改めて以下に列挙する。

- 重力に抗した方向を含め、様々な方向への俊敏な運動
- 各関節が発生するトルクや角速度は広範囲に分布
- 短い運動時間（連続的に運動する必要はない）

最初の二つは、その運動を生成する DC モータにとって非常に厳しい要求である。このような運動の特徴を考慮すると、多自由度跳躍ロボットの設計で用いる限界特性は、实际的で、なおかつ、短時間であればこそ実現可能な運動を表現するものでなくてはならない（定格を超えた使用を許すことを意味する）。

これに関して、我々は、次のように考えた。ロボットの関節の駆動に DC モータを用いる場合、回転角度、回転速度、電流などを制御するために DC モータドライバを合わせて用いるのが普通である。このため、各 DC モータには、次のような制約が課される。

- DC モータに流れる電流は、ある値で制限される。
- DC モータへの印加電圧は、電源電圧を超えない。

使用する DC モータに対して適切な DC モータドライバを選択し、適切な電源を選択したとするならば、この二つの制約は、最も外側にある制約であり、事実上、破ることの許されない制約となる。したがって、この制約を基に定めた、DC モータの限界特性は、先に示した特徴を備えており、多自由度跳躍ロボットの設計で用いるのに相応しい限界特性といえよう。つまり、DC モータに流れる電流を i 、DC モータへの印加電圧を V 、電流制限値を $i_{max}(>0)$ 、電源電圧を $V_{max}(>0)$ としたとき、この限界特性は次式によって表される (Fig. 10)。

$$|i| \leq i_{max}, \quad |V| \leq V_{max} \quad (22)$$

4.2 電流、電圧の計算

ここでは、関節の運動状態が与えられたとき、そこから、DC モータに流れる電流、および、DC モータへの印加電圧を計算する方法について述べる。ここで用いる、DC モータのモデルを Fig. 11 に、記号一覧を以下に示す。

- $\dot{\theta}_m$: DC モータの出力軸角速度
- τ_m : DC モータの出力軸トルク

Fig. 10 Limit characteristic of DC motor for Multi-DOF Jumping Robot design

Fig. 11 Model of DC motor

- ξ : 減速比
- $\dot{\theta}$: 関節角速度 ($\dot{\theta} = \dot{\theta}_m / \xi$)
- τ : 関節トルク ($\tau = \tau_m \xi$)
- R_a : 電機子抵抗 (銅損)
- R_h : 風損, 機械損, 渦電流損 (鉄損) を表す電気抵抗
- K : トルク定数
- L : インダクタンス
- J : ロータ慣性モーメント
- V : 印加電圧
- E : 逆起電力
- $i, i_{m,h}$: 電流

DC モータのモデルに関して、 R_h , L , J の効果を考慮しないモデルも広く用いられているが、多自由度跳躍ロボットの運動は極めて動的なものであるため、これらの効果も考慮したモデルを採用することにした。

まず、DC モータの基礎式として、次式が成り立つ。

$$E = K \dot{\theta}_m \quad (23)$$

$$K i_m = \tau_m + J \ddot{\theta}_m \quad (24)$$

また、Fig. 11 の等価回路部分を参照して、 i_h , i_m は、それぞれ次式のように表される。

$$i_h = \frac{E}{R_h} = \frac{K}{R_h} \dot{\theta}_m \quad (25)$$

$$i_m = i - i_h = i - \frac{K}{R_h} \dot{\theta}_m \quad (26)$$

式 (26) を式 (24) に代入し整理すると、 i および V は、それぞれ、次式のように表される。

$$i = \frac{K}{R_h} \dot{\theta}_m + \frac{J}{K} \ddot{\theta}_m + \frac{1}{K} \tau_m$$

Fig. 12 Current and voltage calculation sequence

$$= \frac{K\xi}{R_h} \dot{\theta} + \frac{J\xi}{K} \ddot{\theta} + \frac{1}{K\xi} \tau \quad (27)$$

$$V = L\dot{i} + R_a i + K\dot{\theta}_m \quad (28)$$

式 (27), (28) から分かるように、減速比 ξ によって i , V は大きく変化するため、その設定は非常に重要である。

さて、ここで誘導した、式 (27), (28) を用いれば、先に述べた運動計画によって生成された運動を行う際に、各関節を駆動する DC モータに流れる電流 $i(t)$ 、および、DC モータへの印加電圧 $V(t)$ が以下の手順によって計算できる (Fig. 12)。まず、運動計画によって、関節角度 $\theta(t)$ 、関節角速度 $\dot{\theta}(t)$ 、関節角加速度 $\ddot{\theta}(t)$ が生成される。これらを、運動方程式に代入し、逆動力学計算を行うことで、関節トルク $\tau(t)$ が得られる。そして、 $\dot{\theta}(t)$, $\ddot{\theta}(t)$, $\tau(t)$ を式 (27) に代入し、 $i(t)$ が得られる。さらに、 $i(t)$ を計算し、 $\dot{\theta}(t)$, $i(t)$, $\ddot{\theta}(t)$ を式 (28) に代入すれば、 $V(t)$ が得られる。

以上の方法で計算された各 DC モータの電流および電圧が、すべて、式 (22) で示される条件を満足していれば、その運動は実現可能であり、それ以外の場合は、実現不可能と判断する。

5. シミュレーション結果と考察

多自由度跳躍ロボットの計算機シミュレーションモデルを Fig. 13 に示す。リンクの質量、慣性モーメント、関節可動範囲、減速比、足形状などの設計パラメータは、機械設計上、実現できるか否かを考慮した上で、様々な値についてシミュレーションを行った結果、設定したものである (DC モータおよび DC モータドライバもロボット本体に搭載することを想定した設計パラメータとなっている)。また、各関節を駆動する DC モータのパラメータを Table 1 に示す (各関節とも同一の DC モータ)。これらは、実際に市販されている DC モータおよび DC モータドライバのいくつかについてシミュレーションを行い、その結果から選択したものである。

跳躍運動の中でも特徴的な二つの運動についてシミュレーションを行った。一つは、境界状態において重心廻りの角運動量が零となり、その後、前方向に飛び出すという跳躍運動である。この跳躍運動を Normal Jump と呼ぶことにする。もう一つは、境界状態において大きな重心廻りの角運動量を持ち、その後、後方宙返りを行うという跳躍運動である。この跳躍運動を Somersault と呼ぶことにする。

シミュレーション結果を Fig. 14~Fig. 16 に示す。Nor-

Fig. 13 Simulation model

Table 1 DC motor parameters (see Fig. 11)

R_a [Ω]	R_h [Ω]	L 10^{-3} [H]	K [Nm/A]	J 10^{-3} [kgm ²]	i_{max} [A]	V_{max} [V]
0.366	278	0.330	0.0302	0.0148	30.0	30.0

Fig. 14 Simulation result : Stick figures of jumping motions (t : time[s])

mal Jump に関しては、境界状態における重心の並進速度 $\dot{P}_{gx}(t_b) = 0.330$ [m/s], $\dot{P}_{gy}(t_b) = 1.50$ [m/s], 重心廻りの角運動量 $L_g(t_b) = 0.00$ [kgm²/s], Joint 4 の角速度および角加速度 $\dot{\theta}_4(t_b) = -25.0$ [rad/s], $\ddot{\theta}_4(t_b) = 50.0$ [rad/s²] として、Somersault に関しては、 $\dot{P}_{gx}(t_b) = -0.595$ [m/s], $\dot{P}_{gy}(t_b) = 1.70$ [m/s], $L_g(t_b) = 1.70$ [kgm²/s], $\dot{\theta}_4(t_b) = 27.3$ [rad/s], $\ddot{\theta}_4(t_b) = 80.0$ [rad/s²] として運動計画を行っている (運動計画の際に設定する、各節点の時間および関節角度は、Fig. 15 に示

Fig. 15 Simulation result : Values versus time during jumping motions

Fig. 16 Simulation result : Floor reactions during ground phases (see Fig. 4 and Eq. (8))

した関節角度の時間変化を参照)。

まず, Fig. 15 に注目すると, Normal Jump, Somersault とともに, 各関節角度は, 可動範囲内に収まっており, また, 各関節を駆動する DC モータの電流と電圧の値は, 許容値である ± 30 [A], ± 30 [V] 以内に収まっている様子が確認できる。次いで, Fig. 16 の接地期における床反力の時間変化に注目すると, Normal Jump, Somersault とともに, 境界状態において床反力の

鉛直方向成分 (F_{fly}), 水平方向成分 (F_{flx}) が同時に零になっており, また, 境界状態に至るまで, 式 (1) (足が床を引っ張らないための条件), 式 (8) (爪先立ち, 踵立ちにならないための条件) が常に満たされている様子が確認できる。さらに, 床反力の水平方向成分の大きさと鉛直方向成分の比の最大値, すなわち, 要求される静止摩擦係数は, Normal Jump 時に 0.207, Somersault 時に 0.352 となっているが, これは, 足裏と床面の材質を選べば, 実現可能な値であり, 式 (2) (足が滑らないための条件) も満たされる。つまり, Fig. 16 の結果は, Normal Jump, Somersault とともに, Fig. 3 A のタイプの跳躍運動が実現されていることを示している。

以上の結果から, Fig. 13, Table 1 に示した, 実際的な設計パラメータをもつ多自由度跳躍ロボットは, 実際に, Fig. 14 のような跳躍運動を実現できると期待できる。

6. おわりに

本論文では, 多自由度跳躍ロボットの機械モデル設計に際し, 以下に列挙する結論を通じて, その設計パラメータを決定するための方法論を示した。

- 対象とする跳躍運動 (接地期において, 足が滑らず, 爪先立ちにも踵立ちにもならない) を明確化し, その跳躍運動を実現するための条件を誘導した。
- 浮遊期の運動が, 境界状態によって特徴付けられることに着目し, 境界状態を基にした跳躍運動の運動計画方法を示した。
- 多自由度跳躍ロボットの設計においては, DC モータの限界特性を, 最大電流および最大電圧によって定義するのが妥当であることを示し, さらに, その計算方法を示した。
- 機械設計上, 実際に設定可能な設計パラメータを持った多自由度跳躍ロボットのモデルを示し, それが実現可能な跳躍運動を計算機シミュレーションによって示した。

今後, 本論文で示した設計パラメータをもとに, 実際に多自由度跳躍ロボットの機械モデルを製作し, その運動実験を行う予定である。

謝 辞 本研究は文部科学省科学研究費 (COE 形成基礎研究費スーパーメカノシステム) を使用して行われた。ここに感謝の意を表する。

参考文献

- [1] 美多: 非線形制御入門. 昭晃堂, 2000.
- [2] 広瀬, 佐藤: “多自由度ロボットの干渉駆動”, 日本ロボット学会誌, vol.7, no.2, pp.128-134, 1989.
- [3] 有川, 広瀬: “3D 荒地用歩行ロボットの研究”, 日本ロボット学会誌, vol.13, no.5, pp.138-144, 1995.
- [4] M.H. Raibert, H.B. Brown, Jr. and M. Cheppong: “Experiments in Balance with a 3D One-Legged Hopping Machine,” The International Journal of Robotics Research, vol.3, no.2, pp.75-92, 1984.
- [5] J.K. Hodgins and M.H. Raibert: “Biped Gymnastics,” The International Journal of Robotics Research, vol.9, no.2, pp.115-132, 1990.
- [6] R.R. Playter and M.H. Raibert: “Control of a Biped Somersault in 3D,” Proceedings of the 1992 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, pp.582-

589, 1992.

- [7] 山藤, 三矢: “跳躍移動ロボットの開発と運動制御”, 日本機械学会論文
文集 (C 編), vol.57, no.537, pp.1616-1620, 1991.
- [8] 中野, 大久保: “跳躍ロボット全般について”, 日本ロボット学会誌,
vol.11, no.3, pp.342-347, 1993.

- [9] 大久保, 中野, 木村: “ばねとアクチュエータによる跳躍機械の構成
法”, 日本ロボット学会誌, vol.10, no.7, pp.948-954, 1992.
- [10] 光永, 五百井: “跳躍型移動ロボットの跳躍実験”, 第 17 回日本ロボッ
ト学会学術講演会予稿集, pp.595-596, 1999.

有川敬輔 (Keisuke Arikawa)

1970 年 10 月 30 日生. 2000 年東京工業大学大学院機械物理工学専攻博士課程修了. 博士 (工学). 2000 年より日本学術振興会特別研究員として, 東京工業大学大学院機械制御システム専攻に在籍. 脚型ロボットの機構と制御の研究に従事.

(日本ロボット学会正会員)

美多 勉 (Tsutomu Mita)

1947 年 6 月 1 日生. 1975 年東京工業大学大学院理工学研究科博士課程 (電気工学専攻) 修了, 同年千葉大学講師, 90 年同教授を経て, 95 年東京工業大学工学部制御システム工学科教授. 制御理論, 非線形制御のロボット工学への応用に関する教育研究に従事. 計測自動制御学会, IEEE などの会員 (工学博士). 計測自動制御学会論文賞, 著述賞, 技術賞など受賞.

(日本ロボット学会正会員)